



OTIMIZAÇÃO E TEORIA DAS RESTRIÇÕES: DUAS ABORDAGENS COMPLEMENTARES PARA O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES

MATHEUS ARTIOLI LEANDRIN - matheus_leandrin@yahoo.com.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

ADRIANA CRISTINA CHERRI - adriana@fc.unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FC

FERNANDO BERNARDI DE SOUZA - fbernardi@feb.unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

Área: 6 - PESQUISA OPERACIONAL

Sub-Área: 6.6 - ANÁLISE DE DEMANDAS POR PRODUTOS

Resumo: O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES VEM SENDO ESTUDADO AMPLAMENTE NO DECORRER DOS ANOS. COMUMENTE TÉCNICAS EXATAS DE OTIMIZAÇÃO SÃO UTILIZADAS PARA RESOLVER ESTE TIPO DE PROBLEMA. ESTE TRABALHO BUSCA ESCLARECER QUAL O PAPEL DOS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO NO DIMENSIONAMENTO DE LOTES DE PRODUÇÃO SEGUNDO A TEORIA DAS RESTRIÇÕES (TOC). UMA BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA É FEITA PARA ESCLARECER ASPECTOS DO PLANEJAMENTO DE CONTROLE DA PRODUÇÃO ENCONTRADOS NAS TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO NA TEORIA DAS RESTRIÇÕES. AS DUAS PERSPECTIVAS PODEM SER COMPLEMENTARES QUANDO A OTIMIZAÇÃO É UTILIZADA PARA MELHORIAS LOCAIS.

Palavras-chaves: DIMENSIONAMENTO DE LOTES; PROGRAMAÇÃO LINEAR; TEORIA DAS RESTRIÇÕES; OTIMIZAÇÃO.

OPTIMIZATION AND THEORY OF CONSTRAINTS: TWO COMPLEMENTARY APPROACHES FOR THE LOT SIZING PROBLEM

Abstract: *THE LOT SIZING PROBLEM HAS BEEN WIDELY STUDIED FOR OVER THE YEARS. GENERALLY EXACT TECHNIQUES OF OPTIMIZATION ARE USED TO SOLVING THIS KIND OF PROBLEM. THIS PAPER SEEKS TO EXPLAIN THE ROLE OF OPTIMIZATION METHODS ON LOT SIZING PROBLEM ACCORRADING TO THEORY OF CONSTRAINTS (TOC). A BRIEF LITERATURE REVIEW IS DONE TO EXPLAIN CHARACTERISTICS OF THE PRODUCTION PLANNING CONTROL FOUND IN OPTIMIZATION TECHNIQUES AND ON THEORY OF CONSTRAINTS. BOTH PERSPECTIVES CAN BE COMPLEMENTARY WHEN THE OPTIMIZATION IS USED IN LOCAL IMPROVEMENTS.*

Keyword: *LOT SIZING; LINEAR PROGRAMMING; THEORY OF CONSTRAINTS; OPTIMIZATION.*

1. Introdução

Existe uma maneira correta de se dimensionar lotes de produção? Ou ainda, existe uma maneira errada de se dimensionar lotes de produção? Uma coisa é certa, há muitos anos existe uma busca pela excelência operacional, e desde então, métodos e ferramentas são desenvolvidas ou aprimoradas com este intuito.

O conceito de dimensionamento de lotes ou *lot sizing* é antigo e se aplica às empresas que trabalham com a fabricação de itens ou componentes. Estas empresas nem sempre possuem somente um produto ou um item a ser produzido, nem mesmo possuem uma demanda fixa, ou outras variações inerentes a este tipo de problema, mas que serão apresentadas no decorrer deste trabalho.

Os métodos exatos de otimização da pesquisa operacional, como otimização linear, otimização inteira, otimização inteira mista, entre outros, abordam o problema de dimensionamento de lotes (PDL) e possuem modelagens matemáticas para determinar a solução ótima destes problemas de acordo com as variações que podem surgir. O objetivo das modelagens é determinar o tamanho do lote de um item específico de forma que o custo de fabricação seja minimizado, observando as restrições de tempo dos períodos de fabricação, a demanda de cada período e os recursos disponíveis para produção (Araújo e Rangel, 2014). Este é um procedimento eficiente de se determinar o quanto de cada item deve ser produzido e em qual período, de forma a atender uma demanda estabelecida, entretanto também é uma estratégia questionável.

A metodologia de melhoria contínua proposta pelo Dr. Eliyahu M. Goldratt, chamada de Teoria das Restrições (TOC), não parte do princípio de propor soluções ótimas. Nela o PDL é visto de forma diferente. Desta forma, os principais conceitos e definições serão abordados neste trabalho. A forma como a otimização e a TOC abordam os conceitos de lotes e a perspectiva de cada método sobre o problema de dimensionamento de lotes será abordada neste trabalho buscando resposta à seguinte questão de pesquisa: Qual o papel dos métodos de otimização no dimensionamento de lotes de produção segundo a Teoria das Restrições?

O trabalho proposto também possui os quatro objetivos:

- a) Contribuir para uma melhor compreensão sobre o tema dimensionamento de lotes;
- b) Abordar os principais conceitos de dimensionamento de lotes sob a perspectiva da otimização (Pesquisa Operacional);
- c) Discutir como a TOC aborda o conceito de lotes;
- d) Discutir como a TOC e a otimização se interagem.

No trabalho que segue, a Seção 2 apresenta-se o PDL. Na Seção 3 serão discutidas as implicações para o problema ótimo de PDL, e na Seção 4 como a TOC aborda a questão do planejamento e controle da produção e como os conceitos de lote de produção e lotes de transferência podem influenciar dentro de um sistema produtivo. A Seção 5 apresenta uma discussão sobre esse trabalho e a Seção 6 refere-se às conclusões deste trabalho.

2. O Problema de Dimensionamento de Lotes

O PDL é um problema de planejamento da produção de viés decisório, pois visa a estabelecer o que produzir, quanto e quando, levando em consideração um horizonte de planejamento que pode ser de curto, médio ou longo prazo. O horizonte de planejamento é apenas um dos aspectos, salientado por Karimi (2003), que envolvem o PDL. Outros aspectos que geram variações do problema serão discutidos na Seção 3.

O primeiro modelo que surgiu com o estudo do dimensionamento de lotes e também da análise de estoques foi proposto por Ford Whitman Harris por volta de 1913. Segundo Andriolo *et al.* (2014), o *Economic Order Quantity* (EOQ) trouxe a primeira abordagem de lote econômico de produção para recursos de capacidade infinita, horizonte de planejamento infinito, com uma demanda constante para único-item. O problema continuou a ser estudado no decorrer dos anos e, por volta dos anos cinquenta, Wagner e Whitin (1958) propuseram um modelo para único-item, os quais estão compreendidos em um processo de único estágio, e recursos com capacidade infinita. Uma mudança proposta pelos autores em relação ao primeiro modelo EOQ foi considerar que o horizonte de planejamento é finito e está dividido em períodos discretos, logo a demanda passa a ser dinâmica e determinística para cada período. Outras mudanças para o problema EOQ são estudadas por Helmrigh *et al.* (2015).

Segundo Araújo *et al.* (2014), as implicações do PDL variam de acordo com o tipo de organização, ou seja, não somente o tempo proporcionou uma evolução na forma como os modelos foram apresentados, mas também o próprio ambiente das organizações causou essa mudança, muito por conta dos métodos de planejamento da capacidade finita dos recursos.

Definir um lote de produção consiste em admitir que a capacidade produtiva da planta seja limitada. Contudo, os primeiros sistemas de planejamento da produção baseavam-se em um planejamento infinito dos recursos (Helber, 1995), ou seja, o plano de produção gerado admitia que os recursos utilizados no processo produtivo não possuísem restrição quanto à capacidade de produção. Os sistemas atuais consideram a capacidade finita dos recursos para o planejamento da produção. O software de programação da produção OPT (*Optimum*

Production Technology) é um exemplo de um sistema de planejamento da produção baseado na capacidade finita dos recursos, Souza (2005).

A história do dimensionamento de lotes demonstra que independente do contexto de planejamento de produção, a busca por definir quantidades mínimas de itens iguais a se produzir remonta à primeira concepção de lote econômico de produção, quando não havia um horizonte de planejamento finito e nem capacidade finita dos recursos. Desta forma, pode-se dizer que houve uma evolução no estudo referente aos PDL.

3. Problema de Dimensionamento de Lotes sob a Perspectiva de Otimização

O objetivo de se utilizar técnicas de otimização para o PDL é obter soluções ótimas, ou seja, dimensionar lotes ótimos minimizando os custos de produção. Utilizando técnicas da Pesquisa Operacional, é possível modelar problemas utilizando Otimização Linear, Otimização Inteira, Otimização Inteira Mista. Comumente, a técnica utilizada para o PDL é o de Otimização Inteira Mista, ou do inglês MIP (*Mixed Integer Programming*). As técnicas de solução de problemas inteiros mistos não serão discutidas neste trabalho, mas são encontradas em Oliveira e Morabito (2006), Padberg e Rinaldi (1991) e Kawamura (2006).

Segundo Araujo (2014), a técnica exata de otimização parte da utilização de um modelo matemático para resolver o PDL. O modelo é composto por uma função objetivo que pode minimizar os custos de fabricação de determinado item, preparação da linha de produção para a fabricação dos itens e armazenamento de itens que forem produzidos para estoque. Segundo Choudhary e Shankar (2011), é possível incluir na função objetivo uma penalização por atraso na demanda de itens ou pelo seu não cumprimento. Além da função objetivo, os modelos matemáticos apresentam restrições que os representam. Cada restrição é muito peculiar ao ambiente do problema estudado; algumas considerações com viés do planejamento da produção e que definem não somente características das restrições, mas também os aspectos do PDL, são abordados por Karimi (2003) nos tópicos:

- Itens;
- Estágios;
- Demanda;
- Horizonte de Planejamento;
- Capacidade;
- Tempo e custo de preparo;
- Estoque;

- Atraso na entrega.

A priori, os tópicos mais peculiares que dizem a respeito ao planejamento da produção são o horizonte de planejamento, capacidade e demanda.

Um problema pode possuir um horizonte de planejamento infinito, ou seja, não existe um intervalo de tempo definido entre o planejamento anterior e o seguinte, planeja-se uma única vez. Em contrapartida, o horizonte de planejamento finito considera um intervalo de tempo entre os planejamentos, esse intervalo é chamado de período. Os períodos podem ser discretos ou contínuos. Quando o horizonte de planejamento é finito, é comum que os períodos sejam discretos, assim como abordado por Gicquel *et al.* (2014). Entretanto, quando o horizonte de planejamento é infinito, o período passa a ser único e contínuo, como apresentado por Arenales *et al.* (2015).

O problema é capacitado quando o planejamento é feito levando em consideração a capacidade finita dos recursos, ou seja, determinado recurso possui uma restrição de capacidade. Todavia, o problema é considerado não-capacitado quando não existe um limite de produção para um determinado recurso. Os primeiros modelos para o PDL consideravam uma capacidade infinita dos recursos, assim como o modelo proposto por Manne (1958). Segundo Souza (2005), os primeiros sistemas de planejamento de produção também consideravam as capacidades dos recursos como sendo infinitas. Como exemplo de modelos baseados na capacidade finita dos recursos é possível citar os trabalhos de Helber e Sahling (2010).

No PDL a demanda pode ser estática quando ela é constante, ou então dinâmica, quando varia ao longo do tempo. É comum no PDL, para um problema com horizonte de planejamento finito com períodos discretos, que a demanda seja dinâmica, variando de acordo com cada período. Em contrapartida, para problemas com períodos contínuos a demanda é estática. Segundo Alem (2011), um problema tem demanda determinística quando ela é conhecida e estocástica quando é baseada em previsões. Os demais tópicos propostos por Karimi (2003) variam de acordo com as características específicas de cada problema, bem como o ambiente em que está inserido.

Um PDL é caracterizado como múltiplos-itens quando possui mais de uma variedade de itens a se produzir, e único-item caso contrário. Brahimi *et al.* (2006) abordam um problema de único-item e Pawlowski *et al.* (2016) propõem em seu trabalho um modelo para múltiplos-itens.

Com relação ao número de estágios, um problema é considerado de monoestágio

quando o sistema produtivo é composto por somente um recurso que produz de maneira direta. O problema multiestágio apresenta mais de um estágio, que é dependente da sequência de operações de determinado produto. Almender *et al.* (2014) apresentam um modelo para o problema multiestágio.

O PDL é dito um problema de múltiplas máquinas ou máquinas paralelas, do inglês *parallel machines*, quando o mesmo item pode ser processado em máquinas idênticas simultaneamente. O problema no qual é possível utilizar máquinas paralelas possui um viés positivo partindo do princípio que se um lote grande demora muito tempo para ser processado, este pode ter o seu tempo reduzido, em grandes proporções, quando a mesma operação pode ser realizada paralelamente em outra máquina. Outra vantagem de um PDL considerar múltiplas máquinas é devido à possibilidade de agregar as preparações e *setups* por máquina, ou seja, para um período que possui muitas preparações e trocas entre diferentes itens, é possível aumentar a disponibilidade das máquinas quanto se fixa uma preparação por máquina. O PDL para múltiplas máquinas é estudado por Fiorotto *et al.* (2015).

Para problemas capacitados, o tempo de fabricação e de preparação passam a ser uma restrição do sistema. Trigeiro *et al.* (1989) trazem uma abordagem em seu trabalho para tempos gastos com *setups* e custos de preparação. A disponibilidade dos recursos aumenta quando o número de *setups* é minimizado, ou seja, quando existe o aproveitamento de *setups* para itens idênticos ou similares. Na literatura este problema é considerado como um problema de cruzamento de *setups* ou *crossover*, amplamente estudado por Fiorotto *et al.* (2016).

Os modelos apresentados por Arenales *et al.* (2015) consideram o custo da necessidade de armazenar a produção em excesso de itens demandados, ou seja, quando um nível de estoque é gerado ele é contabilizado como custo. Segundo Araujo (2015), o nível de estoque do período anterior pode ser utilizado como referência para a produção do período seguinte, de forma que a quantidade a se produzir do período atual é o nível de estoque do período anterior menos a demanda do período atual.

A produção pode ainda ser penalizada quando existe atraso ou não cumprimento da demanda no período planejado. Segundo Pochet e Wolsey (2006), a produção do lote do período atual deve levar em consideração se houve atraso na produção de itens do lote do período anterior, pois estes itens do período anterior teriam prioridade sobre os atuais, porém com uma penalização na forma de custo para o atraso na produção.

Casos em que o PDL se torna muito complexo, o tempo computacional pode

inviabilizar o método exato, segundo Andrade (2014). Para estes casos é possível utilizar a heurística como forma de solução para o problema. Os autores Silva (2014) e Sukkerd *et al.* (2016) apresentam métodos heurísticos para o PDL e problemas *flow shop*.

4. Problema de Dimensionamento de Lotes sob a Perspectiva da Teoria das Restrições

A TOC é uma metodologia de melhoria contínua criada pelo Dr. Eliyahu Goldratt. Para Goldratt (1990) toda organização possui ao menos uma restrição que a impede de obter resultados melhores, ou como discutido pelo autor, ganhos maiores. Segundo o autor, o objetivo da melhoria contínua deve ser o de tornar a empresa sempre próspera e, para isso, ela deve proporcionar um crescimento exponencial dos resultados acompanhado de estabilidade da organização. Para ele, a metodologia TOC é baseada em duas perspectivas:

Perspectiva baseada em quatro perguntas:

- Por que mudar?
- O que mudar?
- Para o que mudar?
- Como causar a mudança?

Perspectiva baseada em cinco passos:

1. Identificar a restrição do sistema;
2. Decidir como explorar a restrição;
3. Subordinar tudo às decisões anteriores;
4. Elevar (conseguir mais) a restrição;
5. Se a restrição for quebrada na etapa anterior, volte a etapa 1, mas não deixe que a inércia se torne uma restrição.

Para Goldratt (1990, 1992, 1996), a TOC propõe uma metodologia para o planejamento de controle da produção denominada Tambor-Pulmão-Corda (TPC). Segundo Souza (2005) a maneira TPC para se programar a produção parte do princípio que existem apenas alguns poucos recursos com restrição de capacidade (RRCs) que impõem o ritmo de produção da fábrica toda, ou seja, o Tambor. O Pulmão é um intervalo de tempo predeterminado que estabelece quando o material deveria ser liberado para o chão de fábrica. Seu objetivo é evitar interrupções na produção do RRC. A Corda dita o ritmo de liberação de materiais para os recursos. O material é liberado no ritmo que o RRC o consome menos o pulmão de tempo. Desta forma, o fluxo de materiais entre os recursos não-restritivos fica balanceado e a quantidade de estoque em processo limitada.

Segundo Goldratt (1990), existem somente três tipos de pulmões de tempo. O Pulmão de Recurso, que fica à frente do RRC, visa protegê-lo contra as variabilidades dos recursos localizados a montante. O Pulmão de Mercado, ou de Expedição, protege as datas de embarque para os clientes. O Pulmão de Montagem, que contém apenas peças que passam por recursos não restritivos, igualmente permite proteger as datas de entrega dos pedidos aos clientes, evitando que as operações de montagem fiquem aguardando as peças provenientes de recursos não restritivos. O autor também afirma que o método TPC possibilita uma programação implícita de todos os recursos não restritivos da empresa. As ordens de produção devem ser processadas de acordo com a ordem de chegada em seus respectivos destinos e que os lotes de produção devem ser resultado do próprio programa de produção.

Para o gerenciamento das chegadas das ordens em seus destinos, foi criado um padrão de cores a fim de demonstrar o *status* do pulmão e controlá-lo. O pulmão é dividido em três partes iguais. O primeiro terço do pulmão é representado pela cor verde, e não se espera que a ordem chegue em seu destino neste momento, pois isso implica que o pulmão foi superdimensionado e pode ser reduzido. O segundo terço do pulmão é definido pela cor amarela. Neste momento, espera-se que a ordem já esteja em seu destino final, no entanto, não é preciso apressá-la. O último terço do pulmão é representado pela cor vermelha. Quando a cor vermelha é alcançada e a ordem ainda não se encontra no destino final, é preciso tomar providências para apressá-la, pois já se passaram dois terços do pulmão e a entrega pode ficar comprometida.

Goldratt (1990) também faz algumas considerações sob o viés de dimensionamento lotes dentro da perspectiva de gerenciamento de pulmões. Segundo o autor, é possível aglutinar ordens iguais (aumentando os lotes de produção) se, e somente se, tal aglutinação não implicar em atrasos nas entregas ou ociosidades do RRC. Desta forma, é possível economizar preparações e aumentar a disponibilidade de um recurso com restrição de capacidade. Souza (2005) afirma que, ao antecipar a realização de uma tarefa que não seja vermelha, aglutinando com outra idêntica, resulta em aumento desnecessário do estoque, ou seja, a economia gerada com a redução de preparações resultará em mais estoque em processo sem nenhum impacto positivo nas vendas da empresa. Isto evidencia que a TOC não faz uso de métodos para estipular um lote econômico de produção e nem utiliza técnicas de dimensionamento de seus lotes de produção.

Ainda, segundo Goldratt (1990), um plano de produção válido deve levar em consideração as restrições do sistema desde o início de sua elaboração. Para identificar se um

recurso é restritivo, é preciso mensurar, em uma escala de tempo, se o recurso possui disponibilidade demandada no período da programação. O autor afirma que se devem considerar todos os pedidos que deverão ser atendidos no horizonte estabelecido para então mensurar a carga-máquina. Segundo Souza (2005), se um recurso possuir uma disponibilidade de tempo inferior a sua carga, deverá ser considerado restritivo, ou seja, será o RRC do sistema.

Para recursos não restritivos, Goldratt (1990) afirma que a capacidade destes recursos deve ser estritamente maior do que a carga esperada. Este excedente de capacidade é chamado de Capacidade Protetora. Segundo o autor, é preciso que exista um nível de inventário à frente do RRC para proteger seu plano de produção e, conseqüentemente, a capacidade de toda a fábrica. Partindo deste princípio, o nível de inventário precisa ser repostado rapidamente antes que alguma variabilidade do sistema cause uma interrupção no RRC. Por isso, explorar a restrição implica que os recursos não restritivos devem possuir Capacidade Protetora suficiente para absorver as variabilidades e ruídos do sistema como quebras, refugos, retrabalhos e abastecer o RRC além do nível de inventário à frente do próprio RRC.

Para o autor os recursos podem apresentar também conflitos com o tempo, e não somente conflitos com carga e disponibilidade de capacidade. Isso ocorre quando um recurso não restritivo não possui disponibilidade imediata para processar uma tarefa. Essa espera pelo recurso faz com que o pulmão seja consumido rapidamente. Este tempo de espera acaba influenciando o *lead time* total, com uma parcela maior do que o tempo de preparação, processamento e movimentação.

Goldratt (1990) propõe um conceito de Pulmão Dinâmico para atenuar essas variações presentes nos recursos não restritivos que acabam impactando no *lead time* total. A idéia é que, através de uma previsão das possíveis flutuações, os materiais sejam liberados antes para evitar que um recurso não restritivo fique tempo demais ocioso ou, em outro momento, fique muito sobrecarregado. O autor cita ainda a possibilidade de padejar os picos de carga para trás ou para frente na linha do tempo. Ao padejar o pico de carga para frente, é provável que a data de entrega fique comprometida. Outra possibilidade, além de fazer a liberação do material antes da data prevista, é optar por reduzir o tamanho dos lotes de transferência dos recursos localizados entre o RRC e o recurso em questão. Goldratt (1990) sugere que os lotes de transferência sejam menores que os lotes de produção, pois ao fazer com que as peças sejam transferidas ao próximo recurso de seu roteiro sem que o lote total de produção seja finalizado, permite que o próximo recurso não precise passar por um período muito longo de

espera para dar início às tarefas.

5. Discussões

A Teoria das Restrições não faz uso de técnicas para determinar lotes ótimos de produção. Por considerar que os sistemas produtivos estão sujeitos a muitas variabilidades internas (quebras, falhas, problemas de qualidade, de fornecimento, absenteísmo, flutuações naturais dos tempos de processamento, etc.) e externas (imprevisibilidade da demanda, pedidos urgentes, cancelamento, etc.), torna-se inviável modelar matematicamente todos os parâmetros que influenciam nas decisões de lotes de produção. Como alternativa, a TOC busca soluções robustas e que funcionariam bem (mas não de forma ótima) na maioria das vezes. A escolha dos lotes de produção parte deste pressuposto. Para corrigir possíveis falhas no dimensionamento de lotes e lidar com as variabilidades do sistema produtivo, a TOC estimula e recomenda que os recursos apresentem algum nível de excesso de capacidade e que os planos de produção do RRC e de embarque aos clientes sejam protegidos pro pulmões.

A TOC não busca por soluções ótimas, mas, o uso de heurísticas parece estar presente nas propostas da TOC para o dimensionamento de lotes e gerenciamento do pulmão.

As técnicas exatas de dimensionamento de lotes, em alguns casos, visam diminuir o tempo de preparação e, em consequência, aumentar a disponibilidade dos recursos. Porém, segundo a TOC, estoques desnecessários podem ser gerados como resultado de tais ações.

Segundo a TOC, estoques desnecessários ou excessivos atrapalham o fluxo, mas em contrapartida, estoques podem ser necessários quando o objetivo é proteger o RRC das datas de entrega. Assim, é preciso ter à frente do RRC certo nível de estoque que deve ser abastecido pelos recursos não restritivos, e, para prover esse abastecimento, somado com a carga de tarefas normais, é necessário que os recursos não restritivos possuam uma capacidade excedente, ou seja, é preciso que um recurso não restritivo possua Capacidade Protetora. Caso contrário, o nível de estoque necessário à frente do RRC para absorver as flutuações do sistema tenderia ao infinito.

O uso de métodos de otimização exige que, se houver uma alteração na demanda ou outras variações no sistema, é preciso executar o modelo matemático novamente. Na TOC, por outro lado, através da ferramenta de gerenciamento de pulmões, basta administrar essas alterações não-previstas. As variações no TPC são absorvidas pelos pulmões, enquanto que na otimização as variações aumentam a complexidade do problema.

Segundo Goldratt (1990), os lotes de transferências devem ser menores que os lotes de

produção, mas nem por isso se faz necessária a utilização de técnicas de otimização para definir o tamanho desses lotes.

Schrageheim *et al.* (2009) também afirmam que os lotes de transferência devem ser menores que os lotes de produção, pois, caso contrário, o lote de produção pode causar gargalos-rotativos. Segundo os autores, quando uma ordem demora muito tempo para ser processada, ela causará um gargalo em uma estação X, mas após o item seguir a rota de produção, o gargalo pode ser transferido para outra área. Isso pode mascarar os reais RRCs do sistema. Ainda segundo os autores, também não se deve buscar corrigir flutuações vindas da troca do mix de produção, pois certa família de produtos ocupa de uma forma os recursos, diferente de outras, e isso também ocasiona gargalos-rotativos.

Uma discussão relevante é que, em nenhum momento da pesquisa ficou evidenciado que as duas técnicas divergem entre si. Segundo o que foi dito por Schrageheim *et al.* (2009), não é interessante tentar corrigir as defasagens oriundas de variações e flutuação, pois elas podem apontar para falsos RRCs.

Trabalhos que integram de alguma forma técnicas de otimização com a metodologia TOC são encontrados em Hurley (1996), Baptista *et al.* (2011), Liu *et al.* (2011) e Jiang e Wu (2013).

6. Conclusão

A otimização funciona muito bem para o dimensionamento de lotes, pois pode agrupar itens semelhantes a fim de reduzir o número de *setups* e assim aumentar a disponibilidade de um recurso. A TOC, porém, não estimula o uso de soluções ótimas, bastando que sejam boas o suficiente. Por isso, sob o ponto de vista da TOC, não se faz necessária a otimização de lotes de produção, bastando ter um bom gerenciamento do pulmão que indique a necessidade de ajustar os lotes inicialmente estabelecidos.

Quanto ao conceito de lotes, eles devem ser uma consequência da programação da produção e não um dado de entrada para se defini-la. Ademais, ainda segundo a TOC, preferencialmente, os lotes de transferências devem ser menores que os lotes de produção, principalmente em lotes de produção cujo tempo de processamento é alto.

Uma possível combinação da TOC e técnicas de otimização pode ser empregada na etapa em que a TOC explora uma restrição ou um RRC. Como, nestes casos, otimizações locais fazem sentido para a TOC, o uso de técnicas de otimizações para o estabelecimento de lotes de produção no RRC, concomitantemente à geração do seu programa de produção

(Tambor), pode resultar em mais capacidade para aquele recurso e, conseqüentemente, para toda a fábrica.

Para trabalhos futuros, sugere-se que os métodos de a otimização de lotes incorporem os conceitos e perspectivas da TOC em seus modelos matemáticos. Tais modelos poderiam ter como critérios de desempenho a maximização do resultado global do sistema produtivo, ao invés de minimizar os custos de produção ou considerar o impacto sobre o lucro sem considerar adequadamente as interdependências entre os recursos produtivos.

Referências

- ALMEDER, C. KLABJAN, D. TRAXLER, R. LOBO, A. B. Lead time considerations for the multi-level capacitated lot-sizing problem. *European Journal of Operational Research*. vol. 241, n. 3, p. 727-738, 2014.
- ANDRADE, P. R. L. *Otimização na geração de grade horária escolar através de um modelo matemático e das meta-heurísticas busca local e iterated local search*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.
- ANDRIOLO, A. et al. A century of evolution from Harris's basic lot size model: Survey and research agenda. *International Journal of Production Economics*. vol 155, p. 16-38, 2014.
- ARAUJO, S. A. RANGEL, S. Matemática Aplicada ao Planejamento da Produção e Logística – São Carlos, SP: Notas em Matemática Aplicada; SBMAC vol. 76, p. 75, 2014.
- ARENALES, M. ARMENTANO, V. MORABITO, R. YANASSE, H. *Pesquisa Operacional*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- BAHIMI, N. PERES, D. S. NAJID, N. M. NORDLI A. Single item lot-sizing problem. *European Journal of Operational Research*. vol. 168, p. 1-16, 2006.
- BAPTISTA, A. E. LUCATO, C. W. COPPINI, L. N. JUNIOR, V. M. BEKESAS, C. L. *Profit generation in a machining service provider – Optimization combining Theory of Constraints and contribution margin concept*. International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2011.
- CHOUDHARY, D. SHANKAR, R. Modeling and analysis of single item multi-period procurement lot-sizing problem considering rejections and late deliveries. *Computers and Industrial Engineering*. vol. 61, n. 4, p. 1318-1323, 2011.
- FIOROTTO, D. J. ARAUJO, S. A. JANS, R. An analysis of formulations for the capacitated lot sizing problem with setup crossover. *Computers and Industrial Engineering*. vol. 106, p. 338-350, 2016.
- FIOROTTO, D. J. ARAUJO, S. A. JANS, R. Hybrid methods for lot sizing on parallel machines. *Computer and Operations Research*. vol. 63, p. 136-148, 2015.
- GICQUEL, C. LISSER, A. MINOUX, M. Na evaluation of semidefinite programming based approaches for discrete lot-sizing problems. *European Journal of Operational Research*. vol 237, n. 2, p. 498-507, 2014.
- GOLDRATT, E. M. *The haystack syndrome: Sifting information out of the data ocean*. Croton-Hudson, NY: North River Press, 1990.
- GOLDRATT, E. M. *The goal*. Croton-Hudson, NY: North River Press, 1992.
- GOLDRATT, E. M. *Production the TOC way: A self-learning kit*. Croton-Hudson, NY: North River Press, 1996.
- HELBER, S. SAHLING, F. A fix-and-optimize approach for the multi-level capacitated lot sizing problem.

Journal Production Economics. vol. 123, p. 247-256, 2010.

HELBER, S. The Capacitated Production Planning and Control Systems. *OR Spektrum*. vol. 17, p. 5-18, 1995.

HELMRICH, R. J. M. JANS, R. HEUVEL, D. V. W. WAGELMANS, M. P. A. The economic lot-sizing problem with an emission capacity constraint. *European Journal of Operational Research*. vol. 241, n. 1, p. 50-62, 2015.

HURLEY, F. S. A practical heuristic for effective buffer management. *International Journal of Operations and Production Management*. vol. 16, n. 10, p. 89-101, 1996.

JIANG, Y. X. WU, H. H. Optimization of setup frequency for TOC supply chain replenishment system with capacity constraints. *Neural Computing and Applications Journal*. vol. 23, n. 6, p. 1831-1838, 2013.

KARIMI, B. GHOMI, S. F. WILSON, J. The capacitated lot sizing problem: A review of models and algorithms. *Omega*, vol. 31, p. 365-378, 2003.

KAWAMURA, M. S. *Aplicação do método Branch-and-Bound na programação de tarefas em uma única máquina com data de entrega comum sob penalidades de adiantamento e atraso*. p. 71. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Produção, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LIU, L. L. ZHAO, P. G. OU'YANG, S. S. YANG J. Y. Integrating Theory of Constraints and particle swarm optimization in order planning and scheduling for machine tool production. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. vol. 57, n. 1, p. 285-296, 2011.

MANNE A. S. Programming of economic lot sizes. *Management Science*. vol. 4, p. 115-135, 1958.

OLIVEIRA, L. K. MORABITO, R. Métodos exatos baseados em relaxações lagrangeanas e surrogate para o problema de carregamento de paletes do produtor. *Pesquisa Operacional*, vol. 26, n. 2, p. 403-432, 2006.

PADBERG, M. RINALDI, G. A branch-and-cut algorithm for the resolution of large-scale symmetric traveling salesman problems. *Society for Industrial and Applied Mathematics*. vol. 33, n. 1, p. 60-100, 1991.

PAWLOWSKI, G. SZLAPKA, J. O. Scheduling and lot size problems for variable range of products using GA-based method. *International Federation of Automatic Control*. vol. 49, n. 12, p. 662-667, 2016.

POCHET, Y.; WOLSEY, L. *Production planning by mixed integer programming*. New York: Springer Verlag, 2006.

SCHRAGENHEIM, E. DETTMER, W. H. PATTERSON. *Supply Chain Management at Warp Speed Integrating the System from End to End*. NY: Taylor and Francis Group, LLC, 2009.

SILVA, M. F. *Heurísticas para um problema de dimensionamento de lotes com restrições de capacidade e custo de transporte*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada - Universidade Estadual Paulista. São José do Rio Preto-SP, 2014.

SOUZA, F. B. Do OPT à Teoria das Restrições: avanços e mitos. *Produção*, v. 15, n. 2. p. 184-197, 2005.

SUKKERD, W. WUTTIPOORNUN T. Hybrid genetic algorithm and tabu search for finite capacity material requirement planning system in flexible flow shop with assembly operations. *Computers and Industrial Engineering*. vol. 97, p. 157-169, 2016.

TRIGEIRO, W. W. THOMAS, J. MCCLAIN, J. O. Capacitated lot sizing with setup times. *Management Science*. vol. 35, p. 353-366, 1989.

WAGNER, H. WHITIN, T. Dynamic version of the economic lot size model. *Management Science*, vol. 5, p. 89-96, 1958.